

Yeşil Üretim için Çevresel Etki Temelli Termoplastik Malzeme Seçimi: Karşılaştırmalı Bir Hibrit ÇKKV Yaklaşımı

Muhammed Ordu^{*1}, Oğuzhan Der²

^{*1} Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği, OSMANİYE

²Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği, BALIKESİR

(Alınış / Received: 19.04.2023, Kabul / Accepted: 30.04.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 02.05.2023)

Anahtar Kelimeler

Termoplastik,
Malzeme Seçimi,
Yeşil Üretim,
Çevresel Etki,
Sürdürülebilirlik,
Çok Kriterli Karar Verme

Öz: Yeşil üretim için çevreci termoplastik malzeme seçimi imalat sektörü için çeşitli cihazların tasarlanmasında ve üretilmesinde hayati bir rol oynar. Kabul edilebilir bir polimerik malzeme seçme kararı çeşitli değerlendirme kriterleri gerektirir çünkü günümüzde her biri kendi özelliklerine, uygulamalarına, faydalarına ve dezavantajlarına sahip çok sayıda alternatif malzeme mevcuttur. Bu çalışmada, yeşil üretim için çevresel etki temelli uygun termoplastik malzemelerin seçimi için karşılaştırmalı bir hibrit çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımı önerilmektedir. Karar modeli üç ana başlık altında dokuz değerlendirme kriteri ve altı alternatif malzemeden oluşmaktadır. Bu amaçla, malzeme seçim problemlerini çözmek için üç farklı hibrit ÇKKV yöntemi uygulanmıştır (AHP-CoCoSo, AHP-COPRAS ve AHP-WASPAS). Elde edilen sonuçlara göre PP, PVC ve de ABS umut verici özellikler göstermiştir. Ayrıca Spearman'ın sıralama korelasyon analizi yapılmış ve kullanılan hibrit yöntemler birbirleriyle tutarlı sıralamalar üretmiştir. Sonuç olarak, PP'nin yeşil üretim için çevresel etki temelli en uygun termoplastik olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, PVC ve ABS'nin de PP'den sonra önerilebilecek en iyi alternatifler arasında yer aldığı sonucuna varılmıştır. Çalışma, malzeme seçeneklerini sıralamak ve seçim prosedürünü geliştirmek için ÇKKV tekniklerinin kullanımını desteklemektedir. Araştırma, polimerik malzemelerin yeşil üretim süreçleri için seçim mekanizmasına dahil olan endüstriyel yöneticilere ve akademisyenlere büyük ölçüde yardımcı olacaktır.

Environmental Impact-Based Thermoplastic Material Selection for Green Manufacturing: A Comparative Hybrid MCDM Approach

Keywords

Thermoplastic,
Material Selection,
Green Manufacturing,
Environmental Impact,
Sustainability,
Multi Criteria Decision
Making

Abstract: The choice of environmentally friendly thermoplastic materials for green manufacturing plays a vital role in the design and manufacture of various devices for the manufacturing sector. The decision to select an acceptable polymeric material requires a variety of evaluation criteria because there are many alternative materials available today, each with its own characteristics, applications, benefits and drawbacks. In this study, a comparative hybrid multi-criteria decision making (MCDM) approach is proposed for the selection of suitable thermoplastic materials for green manufacturing based on environmental impact. The decision model consists of six alternative materials and nine evaluation criteria under three main categories. For this purpose, three different hybrid MCDM methods are applied to solve material selection problems (i.e., AHP-CoCoSo, AHP-COPRAS and AHP-WASPAS). According to the results obtained, PP, PVC and ABS showed the promising properties. In addition, Spearman's rank correlation analysis is performed, and the hybrid methods used produce consistent rankings with each other. As a result, it is concluded that PP is the most suitable thermoplastic for green manufacturing based on environmental impact. In addition, it is concluded that PVC and ABS are among the best alternatives to be recommended after PP. The study supports the use of

MCDM techniques to rank material options and improve the selection procedure. The research will greatly assist industrial managers and academics involved in the selection mechanism for green manufacturing processes of polymeric materials.

*İlgili Yazar, email: muhammedordu@osmaniye.edu.tr

1. Giriş

Yeşil üretim ve sürdürülebilirlik, çevre üzerindeki olumsuz etkileri minimize etmeye ve doğal kaynakları korumaya odaklanan ve birbirleriyle yakından ilişkili kavramlardır. Yeşil üretim, çevreye olumsuz etkisi en az olan ürünler üretebilmek amacıyla sürdürülebilir malzemelerin, enerji-etkin teknolojik ürün ve ekipmanların ve aynı zamanda daha az atık üretimini sağlayabilen politikaların kullanılmasını içermektedir. Bu yaklaşım, bir ürünün bütün yaşam döngüsünün (yani üretilmesinden bertaraf edilmesine/geri dönüştürülmesine kadar) dikkate alınmasını gerektirmektedir. Sürdürülebilirlik ise sosyal, ekonomik ve çevresel özellikleri kapsayan daha geniş bir kavramı ifade ederken gelecek nesillerin ihtiyaçlarını rahatlıkla karşılarken bugünün ihtiyaçlarını da karşılayabilmek anlamına gelmektedir. Bu da ekonomik büyüme, sosyal gelişim ve çevrenin korunması arasında bir dengeyi zorunlu kılmaktadır. Hem yeşil üretim hem de sürdürülebilirlik, kaynakların sorumlu ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını sağlamada destek sağladıkları için çok büyük bir önem arz etmektedir. İşletmeler ve toplumlar çevreye olan negatif etkilerini azaltmada, doğal kaynakları korumada ve herkes için daha sürdürülebilir bir gelecek inşa etmede yardımcı olabilmeleri için bu uygulamaları benimsemelilerdir [1, 2].

Yeşil üretimin birtakım faydaları (Çevresel fayda, maliyet tasarrufu, geliştirilmiş saygınlık, mevzuata uygunluk ve yenilikçilik gibi) bulunmaktadır. Örneğin, yeşil üretim doğal kaynakların etkin bir şekilde kullanımını, enerji tüketiminde ve atık üretiminde daha çevre dostu olmayı amaçlayarak, kirliliğin ve sera gazı emisyonlarının azalmasını sağlayabilmektedir. Bu yaklaşım iklim değişikliğinin etkilerini daha az hissetmede ve çevreyi korumada yardımcı olarak *Çevresel Fayda* sunmaktadır. Diğer yandan, doğal kaynakları daha az kullanarak ve üretim sürecini optimize ederek enerji tüketimi, hammadde elde edilmesi ve atık bertarafı ile ilgili maliyetleri azaltmaya yardımcı olup *Maliyet Tasarrufu* sağlamaktadır. Ayrıca, yeşil üretim uygulamaları, işletmelerin sürdürülebilirlik ve çevresel sorumluluk konusundaki kararlı duruşunu da göstermektedir. Bu durum, işletmelerin saygınlığını ve müşteri sadakatini artırabilir ve çevreye duyarlı yeni müşterilerin ilgilerini çekerek *Geliştirilmiş Saygınlık* kazandırmaktadır. Bununla birlikte, birçok ülke sürdürülebilir üretim uygulamalarının artmasını teşvik etmek için yasal düzenlemeler ve politikalar geliştirmiştir. Yeşil üretimi benimseyen işletmelerin bu düzenlemelere uyarak yasalara aykırı hareket etmeyip ceza almamaları ile *Mevzuata Uygun* bir işletme olabilmeye fırsatını yakalayabilmektedirler. Yeşil üretimin bir diğer faydası ise, işletmelerin üretim süreçlerini optimize etmek ve çevreye olan olumsuz etkilerini minimize etmek için yeni ve yenilikçi yollar bulmaya teşvik etmektedir. Bu, yeni teknolojilerin ve süreçlerin geliştirilmesine yol açarak işletmelerin *Yenilikçi* yönlerini keşfetmelerini sağlamaktadır [3].

Yeni ürünler tasarlanırken ve geliştirilirken uygun bir malzemenin seçilmesi zor bir karar verme problemi haline gelebilmektedir. Bunun nedeni ise alternatiflerinin sıralanmasında veya en uygun alternatifin belirlenmesinde kullanılan kriterlerin birbirleriyle çelişen özelliklere sahip olmasıdır. Malzeme seçimi sürecinde karar vericileri teşvik eden faktör ise üretim sürecinde performans iyileştirilmesi ve maliyetin en aza indirilmesidir. Ancak kullanım alanlarına bağlı olarak yüksek ısı iletkenliği ve ağırlık azaltma gibi kriterler de uygun malzeme seçimi yapılabilmesi açısından geçerli nedenler arasındadır. Örneğin, havacılık sektöründe ağırlık azaltma, tasarım iyileştirmeleri için en önemli hedeflerden birisi iken ısı transferi cihazlarında ise termal iletim katsayısının mümkün olduğunca yüksek olması istenmektedir. Uygun olmayan malzeme seçimi, müşterilerin ve üreticilerin gereksinimlerinin karşılanamamasına neden olabilmektedir. Ayrıca bir montajın aksamasına ve ürün performansının düşmesine yol açabilmektedir. Bundan dolayı verimlilik ve karlılık olumsuz etkilenmekte ve ileri aşamalarda kurumun itibarının zedelenmesine dahi yol açabilmektedir [4].

Termoplastik polimerler, işletmelerde maliyetlerin azaltılması için endüstriyel ürünlerin üretiminde özellikle son kırk yılda hammadde olarak kullanılmaktadır. Maliyetin yanı sıra ağırlık tasarrufu, esneklik ve ısı yalıtım özellikleri de termoplastiklerin seçilmesinde önemli bir yer tutar hale gelmiştir [5]. Bugün, dünyanın en büyük ekonomisi konumunda bulunan Amerika Birleşik Devletleri'nde plastik endüstrisi, üçüncü en büyük imalat sektörünü temsil etmektedir. Buna ek olarak, dünya genelinde Polimer Kimyası ve Plastik Mühendisliği dereceleri sunan yüzlerce üniversite bulunmaktadır. Plastik teknolojisinin çeşitli alanlarına adanmış yüzlerce farklı profesyonel meslek topluluğu ve de bunlarla birlikte pek çok sayıda bilim insanı vardır [6]. Bu bahsedilen gerçekler dahi termoplastiklerin modern yaşamın vazgeçilmez bir parçasını oluşturduğunun en önemli kanıtlarından birkaçıdır. Plastik şişelerden çocukların oynadıkları oyuncaklara, market poşetlerinden plastik içecek şişelerine kadar günlük hayatta çoğu yerde karşımıza farklı türlerde termoplastikler çıkmaktadır [7].

Termoplastiklerin diğer malzemelere göre sahip olduğu en önemli avantajlardan birisi de maliyet kalemleridir. Hammadde maliyetleri diğer malzemelere göre önemli ölçüde daha düşük olmakla birlikte, işleme maliyetleri de genellikle daha düşüktür. Bir termoplastikten bir parça veya ara ürün imal edilirken başka tür bir malzemeden benzer türde bir parça veya ürün imal etmekte kullanılan işlem adımlarından daha az prosese ihtiyaç duyulmaktadır [8]. Bu sayılan özelliklerin hepsi plastiklerin kullanımından kaçınılamayacak olmasının nedenleri arasındadır.

Hızlı kentleşme ve sanayileşme, dünya genelinde kaynak kıtlığı ile birlikte çevre kirliliği oranını da artırırken, sürdürülebilirliğin önemini de ortaya koymaktadır. Başta G8 ülkeleri olmak üzere gelişmekte olan ülkelerle birlikte, küresel ekonomide sürdürülebilirlik, en çok dikkat edilen konulardan birisi haline gelmiş olup sürdürülebilir kalkınma ile ilgili toplu eylem planları geliştirilmiştir. Ayrıca, son yıllarda ilgili uzmanlar ve araştırmacılar tarafından sürdürülebilirlik konusunda, özellikle yeşil üretim için malzeme seçimini içeren, geniş bir literatür ve araştırma çalışmaları detaylı bir şekilde oluşturulmaktadır [9].

Yukarıda bahsedilen nedenler yeşil malzeme seçimini çok önemli hale getirmektedir. Sürdürülebilir malzeme seçimi olarak da adlandırılan yeşil malzeme seçimi, ürün performansını garanti etmeyi ve yaşam döngüsü boyunca çevreye ve insan sağlığına olan etkiyi azaltmayı amaçlamaktadır [10]. Son yıllarda çevrenin korunması özel ve kamu sektörlerince önem kazanmakta ve imalat sektöründe bulunan firmalar çevre konularını üretim süreçlerine yansıtmaya başlamaktadır. Yeşil malzeme seçme problemi, kirlilik, küresel ısınma ve halk sağlığına zararı gibi çevreyi etkileyen faktörleri en aza indirmeyi amaçlamaktadır. İşletmeleri ekonomik ve çevresel performanslar arasında bir denge kurmaya teşvik eder. Bu nedenle, malzemelerin yeşil kriterleri başarıyla karşıladığını dikkate almak gerekmektedir [10]. Bu durum günlük yaşamımızda pek çok farklı alanda karşımıza çıkan termoplastiklerin seçimini de etkilemektedir.

Malzemelerin çevresel, fiziksel, mekanik ve de ekonomik performanslarına göre seçilmesi için çok kriterli karar verme (ÇKKV) metodolojisinin kullanılmasına ihtiyaç vardır. Son zamanlarda araştırmacılar tarafından yeşil malzeme seçim problemlerine çözüm bulabilmek için birkaç farklı ÇKKV yöntemi kullanmışlardır. Bunların arasında dikkat çeken çalışmalardan bazıları, AHP yöntemi kullanılarak bina projeleri için sürdürülebilir malzemelerin seçiminde kullanılması amacı ile çok kriterli bir değerlendirme modeli sunulmasıdır [11]. Bu çalışmadan sonra inşaat sektörü için sürdürülebilir malzeme seçimini çözmeye yönelik hibrit bir ÇKKV yaklaşımı da başarı ile tanıtılmıştır [12]. Bunlara ek olarak, sürdürülebilirliğin üç önemli bileşenine dayandırılan bir yeşil yapı malzemesini sıralamak için hibrit bir ÇKKV yöntemi önerilmiştir [13]. Ayrıca, DEMATEL, ANP, Gri İlişkisel Analizi (GİA) ve TOPSIS yöntemlerini bir araya getiren hibrit bir ÇKKV yaklaşımı en uygun yeşil malzemeyi seçmek için geliştirilmiştir [14].

Bu çalışmada, çok kriterli karar verme tekniklerinin kullanımı ile çevresel etki temelli termoplastik malzemelerin seçimi amaçlanmaktadır. Öncelikle altı farklı termoplastik malzeme alternatif olarak seçilmiştir: Akrilonitril bütadien stiren, polikarbonat, polimetametakrilit, polipropilen, polivinil klorür ve politetrafloroetilen. Bu alternatifler üç ana kriter ve dokuz alt kriter altında değerlendirilmektedir: Mekanik özellikler (uzama yüzdesi, eğilme modülü ve Young modülü), fiziksel özellikler (ısı iletkenliği, minimum sıcaklık ve maksimum sıcaklık) ve çevresel etki (yeşil) özellikleri (gömülü enerji, karbon ayak izi ve su ayak izi). Yeşil termoplastik malzemelerin belirlenebilmesi için karşılaştırmalı hibrit ÇKKV yaklaşımı kullanılmıştır. Bunun için, öncelikle kriter ağırlıkları AHP yöntemi ile belirlenmiştir. Daha sonra, CoCoSo, COPRAS ve WASPAS yöntemleri ile alternatifler sıralanmıştır. Hibrit yöntemlerin ürettikleri sonucun ne kadar birbirine yakın olduğunu tespit edebilmek için Spearman'ın sıralama korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir.

Makalenin geri kalan kısmı ise şu şekilde organize edilmiştir: Çalışmada kullanılan yöntemler ikinci bölümde anlatılmaktadır. Yeşil üretim için termoplastik malzeme seçim süreci, alternatifler, kriterler ve yöntemlerin uygulanması üçüncü bölümde açıklanmaktadır. Bulgular dördüncü bölümde tartışılmakta olup beşinci bölümde ise çalışma sonuçlandırılmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) Yöntemi ile Kriter Ağırlıklandırma

AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci), öznel ağırlığı değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir karar verme yöntemidir [15]. 1970'lerde Thomas Saaty tarafından geliştirilmiştir ve o zamandan beri mühendislik ve sağlık hizmetleri gibi pek çok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [16]. AHP, karar vericilerin çeşitli kriterleri daha küçük bileşenlere ayırarak ve daha sonra bu bileşenleri ikili olarak karşılaştırarak göreceli önemlerini değerlendirmelerine olanak sağlar [17]. Yöntem, en üstte ana hedef ve alt seviyelerde kriterler ve alternatifler

olmak üzere karar probleminin hiyerarşik bir yapısının oluşturulmasını içerir [18]. AHP, karmaşık karar problemlerini ele alma yeteneği hem nitel hem de nicel verileri barındırma esnekliği ve kriterler arasındaki karşılıklı bağımlılıkları hesaba katma yeteneği dahil olmak üzere öznel ağırlığı değerlendirmek için çeşitli avantajlara sahiptir. AHP yöntemiyle kriter ağırlıklarının belirlenmesi, aşağıdaki gibi birkaç aşamadan oluşur [19]:

1. *Problemin tanımlanması ve hiyerarşinin oluşturulması*: AHP yönteminde ilk adım, karar problemini tanımlamak ve alternatifleri değerlendirmek için kullanılacak kriter ve alt kriter hiyerarşisini oluşturmaktır.

2. *İkili karşılaştırmalar*: Bir sonraki adım, göreceli önemlerini belirlemek için kriterlerin ve alt kriterlerin ikili karşılaştırmalarını yapmaktır. Bu, her bir kriter çifti arasındaki tercih veya önem derecesini belirtmek için Tablo 1'deki sayısal ölçek kullanılarak yapılır.

3. *Ağırlıkların hesaplanması*: Kriterlerin ve alt kriterlerin ağırlıkları, matematiksel formüller kullanılarak ikili karşılaştırmalara dayalı olarak hesaplanır.

Tablo 1. Kriter ağırlıklandırma da sayıların tanımı ve açıklamaları [20].

Sayı	Tanım	Açıklama
1	Eşit önem	İki kriter amaca eşit derecede katkıda bulunur
3	Orta derecede önem	Tecrübe ve muhakeme, bir kriteri diğerine göre biraz daha avantajlı hale getirir
5	Güçlü önem	Tecrübe ve muhakeme, bir kriteri diğerine göre güçlü bir şekilde tercih eder
7	Çok güçlü veya kanıtlanmış önem	Bir kriter diğerine göre çok güçlü bir şekilde tercih edilir; hakimiyeti pratikte kanıtlanmıştır
9	Son derece önemli	Bir kriteri diğerine tercih eden kanıtlar, mümkün olan en yüksek doğrulama mertebesine sahiptir
2, 4, 6, 8	Ara değerler	İki değer arasındaki önem derecesini bildirmektedir

4. *Karar matrisinin normalize edilmesi*: Karar matrisindeki değerler ilgili kriter değerlerinin toplamına bölünerek normalize edilir.

5. *Kriter ağırlıklarının belirlenmesi*: Normalize edilmiş karar matrisinde her bir alternatifin kriterler bazında puanlarının ortalaması alınarak kriter ağırlıkları belirlenmektedir.

6. *Tutarlılık kontrolü*: İkili karşılaştırmaların karar vericinin tercihleriyle tutarlı olduğundan emin olmak için bir tutarlılık kontrolü yapılır. Karşılaştırmalar tutarsızsa, revize edilmeleri gerekebilir. n kriter sayısı olmak üzere, tutarlılık indeksi (Consistency index - CI) Denklem (1)'e göre hesaplanmaktadır [21]. RI , literatürde kullanılan ve rassal tutarlılık indeksi anlamında olmak üzere, tutarlılık oranı (Consistency ratio - CR) Denklem (2)'de verilen eşitlik ile hesaplanmaktadır [21]. CR değerinin %10'un altında olması beklenmektedir. Eğer tutarlılık oranı bu değer üzerinde ise, karşılaştırma matrisi yeniden geliştirilmelidir [17].

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

2.2. Kombine Uzlaşma Çözümü (Combined Compromise Solution-CoCoSo) Yöntemi

Kombine Uzlaşma Çözümü (CoCoSo) yöntemi, alternatifleri birden fazla kritere göre değerlendirmek ve sıralamak için kullanılan çok kriterli karar verme (ÇKKV) tekniğidir [22]. İlk olarak 1998 yılında S.H. Zanakis, A. Solomon, N. Wishart ve S. Dublsh tarafından tanıtılmıştır. CoCoSo yöntemi iki aşamalı bir analiz içerir. İlk aşamada, karar verici kriterleri tanımlar ve bunlara göreceli önemlerine göre ağırlıklar atar. İkinci aşamada, alternatifler her bir kriterdeki performanslarına göre değerlendirilir ve sıralanır. CoCoSo yöntemi daha sonra kriterler arasındaki ödünleşmeleri dikkate alarak ve karar vericinin tercihlerini karşılayan bir dizi etkin alternatif üretmek için uzlaşma çözümü hesaplar [23, 24]. CoCoSo yöntemi, birbiriyle çelişen birden fazla kriter ve hedefin bulunduğu karmaşık karar verme durumlarıyla uğraşırken özellikle kullanışlıdır. CoCoSo yöntemi, kriterler arasındaki ödünleşimleri dikkate alan uzlaşmacı bir çözüm sunarak karar vericilerin bilinçli ve dengeli kararlar almasını sağlar [25]. Alternatifler ve ilgili kriterler belirlendikten sonra aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır [25]:

1. *Kriter değerlerinin normalleştirilmesi*: Uzlaşma normalleştirme denkleminde dayalı olarak gerçekleştirilir [26]. Denklem (3) fayda yönlü kriterlerin, Denklem (4) ise maliyet yönlü kriterlerin normalizasyonu için

kullanılmaktadır. x_{ij} , i . alternatifin j . kriter değeri ve r_{ij} , normalize edilmiş i . alternatifin j . kriter değeri olmak üzere,

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \text{ fayda kriteri için} \quad (3)$$

$$r_{ij} = \frac{\max_i x_{ij} - x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \text{ maliyet kriteri için} \quad (4)$$

2. Ağırlıklı karşılaştırılabilirlik dizisinin toplamı (S_i) ve her alternatif için karşılaştırılabilirlik dizilerinin güç ağırlığının tamamı (P_i) hesaplanır. S_i değeri gri ilişkisel üretim yaklaşımına dayalı olarak Denklem (5) ile P_i değeri de WASPAS çarpımsal tutumuna göre Denklem (6) ile elde edilmektedir. w_j, j . kriterin ağırlık değeri olmak üzere,

$$S_i = \sum_{j=1}^n (w_j r_{ij}) \quad (5)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n (r_{ij})^{w_j} \quad (6)$$

3. Aşağıdaki birleştirme stratejileri kullanılarak alternatiflerin göreceli ağırlıkları hesaplanır. Bu adımda, Denklem (7)-(9) ile üç farklı değerlendirme skoru stratejisi kullanılarak diğer seçeneklerin göreceli ağırlıkları oluşturulur. Denklem (7) ağırlıklı toplam yönteminin ve ağırlıklı çarpım yönteminin puanlarının toplamının aritmetik ortalamasını ifade etmektedir. Denklem (8), ağırlıklı toplam yönteminin ve ağırlıklı çarpım yönteminin en iyiye kıyasla göreceli puanlarının toplamıdır. Denklem (9), ağırlıklı toplam yönteminin ve ağırlıklı çarpım yönteminin model puanlarının dengeli bir şekilde uzlaşmasını ortaya koymaktadır. Denklem (9)'da λ (genellikle $\lambda = 0,5$) karar vericiler tarafından belirlenir. Ancak, esneklik ve istikrar açısından başka değerler de dikkate alınabilir.

$$k_{ia} = \frac{P_i + S_i}{\sum_{i=1}^m (P_i + S_i)} \quad (7)$$

$$k_{ib} = \frac{S_i}{\min_i S_i} + \frac{P_i}{\min_i P_i} \quad (8)$$

$$k_{ic} = \frac{\lambda(S_i) + (1 - \lambda)(P_i)}{(\lambda \max_i S_i + (1 - \lambda) \max_i P_i)} \quad (9)$$

4. Alternatiflerin nihai sıralaması Denklem (10) ile hesaplanan ki değerlerine göre belirlenir.

$$k_i = (k_{ia} k_{ib} k_{ic})^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{3} (k_{ia} + k_{ib} + k_{ic}) \quad (10)$$

2.3. Karmaşık Nisbi Değerlendirme (COMplex PROportional ASsessment-COPRAS) Yöntemi

Karmaşık Nisbi Değerlendirme (COPRAS) yöntemi, bir dizi kritere dayalı olarak alternatifleri değerlendirmek için kullanılan çok kriterli bir karar verme (ÇKKV) yaklaşımıdır [27]. 1980'lerin sonunda Profesör Roman Slowinski ve Polonya Bilimler Akademisi Bilgisayar Bilimleri Enstitüsü'ndeki meslektaşları tarafından geliştirilmiştir. COPRAS yöntemi, karar verme problemi birbirine bağlı ve farklı ölçüm birimlerine sahip birden fazla kriter içerdiğinde özellikle kullanışlıdır [28, 29]. Alinezhad & Khalili (2019) COPRAS yönteminin adımlarını aşağıdaki gibi açıklamaktadır [29]:

1. *Karar matrisinin oluşturulması:* Bu adım, alternatifleri değerlendirmek için kullanılacak kriterlerin belirlenmesini içerir. Bu kriterler ölçülebilir, karar problemiyle ilgili ve birbirinden bağımsız olmalıdır.

2. *Karar matrisinin normalize edilmesi:* Her kriter için veriler, genellikle 0 ile 1 arasında ortak bir ölçeğe göre normalleştirilir. Kriterler farklı ölçüm birimlerine sahip olabileceğinden bu adım gereklidir. r_{ij} , j . kriterin i . alternatif değeri olmak üzere, Denklem (11) ile karar matrisleri normalize edilir.

$$r_{ij}^* = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \quad (11)$$

3. *Ağırlıklı normalize karar matrisinin elde edilmesi:* Bu adımda, karar verici her bir kriterin göreceli önemini dikkate alır. w_j , j . kriterin ağırlığı olmak üzere, Denklem (12) ile hesaplanır.

$$\hat{r}_{ij} = r_{ij}^* \cdot w_j \quad (12)$$

4. *Maksimum ve minimum indekslerin belirlenmesi:* g fayda yönlü kriter sayısını, $n-g$ ise maliyet yönlü kriter sayısını ve S_i ise i . alternatifin maksimum ve minimum indeksini göstermek üzere, Denklem (13) ve (14) ile hesaplanır.

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^g \hat{r}_{ij} \quad (13)$$

$$S_{-i} = \sum_{j=g+1}^n \hat{r}_{ij} \quad (14)$$

5. *Her bir alternatifin göreceli önem değerinin hesaplanması:* Q_i , her bir alternatifin görece önem değeri olmak üzere, Denklem (15) veya (16) ile hesaplanır.

$$Q_i = S_{+i} + \frac{\min S_{-i} \sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{i=1}^m \frac{\min S_{-i}}{S_{-i}}} \quad (15)$$

$$Q_i = S_{+i} + \frac{\sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{i=1}^m \frac{1}{S_{-i}}} \quad (16)$$

6. *Alternatiflerin sıralanması:* Elde edilen puanların büyükten küçüğe doğru sıralanması ile belirlenir.

COPRAS yöntemi, kararların iyi bilgilendirilmiş olmasını ve ilgili tüm faktörlerin kapsamlı bir analizine dayanmasını sağlamaya yardımcı olabilecek karar vermeye yönelik yapılandırılmış bir yaklaşım sağlar. Mühendislik, ekonomi ve yönetim dahil olmak üzere çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [30, 31].

2.4. Ağırlıklı Toplanmış Toplam Ürün Değerlendirmesi (Weighted Aggregated Sum Product Assessment-WASPAS) Yöntemi

Ağırlıklı Toplanmış Toplam Ürün Değerlendirme (WASPAS) yöntemi, bir dizi alternatifi birden fazla kritere göre değerlendirmek için kullanılan çok kriterli bir karar verme tekniğidir [32]. Yöntem 2011 yılında Tzeng ve Huang tarafından geliştirilmiştir ve Basit Toplamsal Ağırlıklandırma (SAW) yönteminin bir modifikasyonudur. WASPAS yönteminde her bir kritere, diğer kriterlere kıyasla göreceli önemini yansıtan bir ağırlık atanır. Ağırlıklar daha sonra her bir alternatif için her bir kriterde ağırlıklı bir puan hesaplamak için kullanılır [33]. Ağırlıklı puanlar daha sonra her bir alternatif için genel bir puan elde etmek üzere toplanır. En yüksek toplam puana sahip alternatif daha sonra en iyi alternatif olarak kabul edilir. WASPAS yönteminin avantajlarından biri hem nesnel hem de öznel kriterlerin dikkate alınmasına olanak sağlamasıdır. Ayrıca yöntem, kriterler için nominal, ordinal, aralık ve oran ölçekleri dahil olmak üzere farklı ölçek türlerinin kullanılmasına izin vermektedir [29, 34]. Alinezhad & Khalili [29], WASPAS yönteminin adımlarını aşağıdaki gibi açıklamıştır:

1. *Karar matrisinin oluşturulması:* Alternatiflerin ve kriterlerin sunulduğu başlangıç karar matrisi geliştirilmektedir.

2. *Karar matrisinin normalizasyonu:* Fayda yönlü kriterler Denklem (17) yardımıyla normalize edilirken Denklem (18) ise maliyet yönlü kriterleri normalize etmektedir. r_{ij} , j . kriterin i . alternatif değeri olmak üzere,

$$r_{ij}^* = \frac{r_{ij}}{\max_i r_{ij}} \quad (17)$$

$$r_{ij}^* = \frac{\min_i r_{ij}}{r_{ij}} \quad (18)$$

3. *Toplamsal göreceli önemin belirlenmesi*: Her bir kriterin ağırlık değeri ile normalize matris değerinin çarpılıp toplanmasıyla hesaplanmaktadır. Q_i^1 , toplamsal göreceli önemi ve w_j , j . kriterin ağırlığı olmak üzere, Denklem (19) toplamsal göreceli önemi hesaplamaktadır.

$$Q_i^1 = \sum_{j=1}^n r_{ij}^* \cdot w_j \quad (19)$$

4. *Çarpımsal göreceli önemin belirlenmesi*: Q_i^2 , çarpımsal göreceli önem olmak üzere, Denklem (20) ile hesaplanmaktadır.

$$Q_i^2 = \prod_{j=1}^n (r_{ij}^*)^{w_j} \quad (20)$$

5. *Ortak genelleştirilmiş kriterin belirlenmesi*: Toplamsal ve çarpımsal metotların entegrasyonu için Denklem (21) kullanılır.

$$Q_i = \frac{1}{2}(Q_i^1 + Q_i^2) \quad (21)$$

6. *Alternatiflerin sıralanması*: Elde edilen puanların büyükten küçüğe doğru sıralanması ile belirlenir.

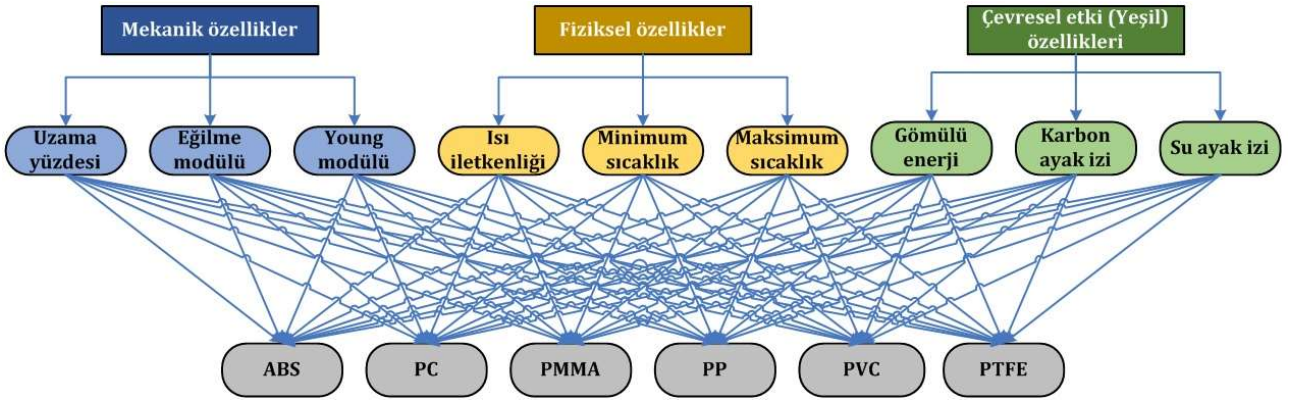
3. Yeşil Üretim için Termoplastik Malzeme Seçimi

Yeşil malzeme seçimi, farklı kriter türlerini (çevresel, fiziksel ve mekanik gibi) göz önünde bulundurarak en uygun termoplastik malzeme seçiminde en önemli çok kriterli karar verme (ÇKKV) problemlerinden biridir. Bu araştırmanın amacı, yeşil termoplastik malzeme seçimi yapılırken çevre sorunlarını çözümlen, mekanik ve fiziksel performansın önemini bilinmesini teşvik etmektir. Çalışmamızın kriterler hiyerarşisi ise Şekil 1'de gösterilmektedir.

3.1. Alternatifler

Yeşil termoplastik malzeme seçimi için uygun olabilecek altı farklı tipte termoplastik malzeme seçilmiştir. Bunlar; Akrilonitril bütadien stiren (ABS), Polikarbonat (PC), Polimetil metakrilat (PMMA), Polipropilen (PP), Polivinil klorür (PVC) ve Politetrafloroetilen (PTFE)'dir. Sektörlerde yaygın olarak kullanılan bu malzemelerin temel özelliklerinden aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

Akrilonitril bütadien stiren (ABS), otomotiv parçaları, oyuncaklar ve ev aletleri de dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılan termoplastik bir polimerdir. Akrilonitril, bütadien ve stirenin polimerize edilmesiyle elde edilen bir kopolimerdir. ABS, yüksek darbe direnci, iyi ısı direnci ve mükemmel boyutsal kararlılığı ile bilinir. Ayrıca hafif ve işlenmesi kolay olduğundan enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon prosesleri için popüler bir seçimdir. ABS'nin benzersiz özelliklerinden biri, farklı özellikler elde etmek için katkı maddeleri ile kolayca modifiye edilebilmesidir. Örneğin, ABS UV ışığına karşı daha dayanıklı olacak veya alev geciktiriciliği geliştirilecek şekilde modifiye edilebilir. Genel olarak ABS, mekanik, termal ve işleme özellikleri arasında iyi bir denge sunan çok yönlü ve yaygın olarak kullanılan bir polimerdir [35].



Şekil 1. Kriterler hiyerarşisi

Polikarbonat (PC), olağanüstü tokluğu, darbe direnci ve şeffaflığı ile bilinen termoplastik bir polimerdir. Genellikle güvenlik gözlükleri, araba farları ve koruyucu kalkanlar gibi güvenlik ve dayanıklılığın kritik olduğu uygulamalarda kullanılır. Polikarbonat, bisfenol A ve fosgenin polimerizasyonu ile elde edilir. Elde edilen polimer, mükemmel mekanik özelliklerine katkıda bulunan yüksek bir moleküler ağırlığa ve doğrusal bir yapıya sahiptir. Polikarbonatın en önemli avantajlarından biri darbe direncidir. Neredeyse kırılmazdır ve çatlamadan veya kırılmadan önemli darbelerle dayanabilir, bu da onu güvenlik uygulamaları için mükemmel bir seçim haline getirmiştir. Buna ek olarak, polikarbonat iyi bir boyutsal kararlılığa sahiptir ve karmaşık şekillere kolayca kalıplanabilmektedir. Polikarbonat ayrıca yüksek şeffaflığı ile bilinir, bu da onu optik netliğin önemli olduğu uygulamalar için popüler bir seçim haline getirmiştir. UV ışığına karşı iyi bir dirence sahip olmasından ötürü dış mekân uygulamaları için çok uygundur. Genel olarak polikarbonat, çok çeşitli uygulamalar için uygun olmasını sağlayan benzersiz bir özellik kombinasyonuna sahip çok yönlü bir polimerdir [36, 37].

Polimetil metakrilat (PMMA), genellikle akrilik cam veya sadece akrilik olarak bilinen sentetik bir polimerdir. Genellikle cama kırılmaya karşı dayanıklı bir alternatif olarak kullanılan şeffaf ve sert bir termoplastik malzemedir. PMMA yüksek optik netliğe sahiptir ve aynı zamanda hafiftir, hava koşullarına dayanıklıdır ve çizilmeye karşı dirençlidir, bu da onu çok çeşitli uygulamalarda popüler bir malzeme haline getirir. PMMA, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve döküm gibi teknikler kullanılarak levhalar, tüpler ve bloklar gibi çeşitli şekillerde kalıplanabilir. PMMA, inşaat, otomotiv, elektronik ve medikal dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Genellikle tabelalar, aydınlatma armatürleri, pencereler, lensler ve akvaryumlar için kullanılır. PMMA ayrıca diş dolgularında, yapay kemik ve de kornea üretimlerinde de kullanılmaktadır. PMMA genellikle gıda ile temas eden uygulamalarda ve tıbbi cihazlarda kullanım için güvenli kabul edilir [38].

Polipropilen (PP), benzersiz özellikleri nedeniyle çok çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılan termoplastik bir polimerdir. Yüksek sıcaklıklara dayanabilen, kimyasallara ve yorulmaya karşı dirençli, esnek, hafif ve sağlam bir malzemedir. PP, propilen monomerinin polimerizasyonu ile üretilir. PP, mükemmel nem direnci ve bariyer özellikleri nedeniyle şişe, kapak ve film gibi ambalaj malzemelerinin üretiminde yaygın olarak kullanılır. Ayrıca otomotiv parçaları, oyuncaklar, tıbbi ekipman ve inşaat malzemeleri üretiminde de kullanılır. PP'nin en önemli avantajlarından biri geri dönüştürülebilir olmasıdır. Özelliklerini kaybetmeden birçok kez geri dönüştürülebilmesi, onu sürdürülebilir ambalaj çözümleri için popüler bir malzeme haline getirmektedir. Ayrıca, PP düşük yoğunluğa sahiptir. Bu özelliğinden ötürü diğer termoplastikler ile kıyaslandığında aynı hacmi üretmek için daha az malzeme gerektiği anlamına gelmektedir. Sonuç olarak daha düşük bir çevresel ayak izi ile sonuçlanmasına neden olur. Genel olarak PP, benzersiz özellikleri ve geri dönüştürülebilirliği nedeniyle çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılan çok yönlü ve uygun maliyetli bir malzemedir [39].

Polivinil klorür (PVC), vinil klorür monomerinden yapılan sentetik bir polimerdir. Dayanıklılığı, kimyasallara ve hava koşullarına karşı direnci ve düşük üretim maliyeti nedeniyle çok çeşitli ürünlerde yaygın olarak kullanılan çok yönlü bir plastiktir. PVC tipik olarak borular, pencere çerçeveleri ve vinil dış cephe kaplamaları gibi inşaat malzemelerinde kullanılır. Ayrıca elektrik kablolarında, tıbbi cihazlarda ve oyuncaklar ve şişirilebilir ürünler gibi çeşitli tüketici ürünlerinde de kullanılır. PVC, sert ve esnek PVC gibi farklı formlarda üretilebilir. Sert PVC inşaat uygulamalarında kullanılırken, esnek PVC tıbbi hortumlar ve şişirilebilir ürünler gibi esneklik gerektiren ürünlerde kullanılır [40].

Politetrafloroetilen (PTFE), yapışmazlık özellikleri ve kimyasal direnci ile bilinen sentetik bir polimerdir. Yüksek sıcaklık direnci, düşük sürtünme katsayısı ve mükemmel elektriksel özellikleri nedeniyle çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. PTFE yaygın olarak Teflon ticari adıyla da bilinir. Genellikle pişirme kapları için bir kaplama olarak ve ayrıca contalar ve yataklar gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Termoplastik bir

polimerdir, yani eritilebilir ve birden çok kez yeniden kalıplanabilir. PTFE'nin benzersiz özelliklerinden biri, son derece düşük sürtünme katsayısıdır, bu da onu kayma veya sürtünme temasının gerekli olduğu uygulamalarda kullanım için ideal kılar. Ayrıca çoğu kimyasal maddeye ve çözücüye karşı dayanıklıdır, bu da onu zorlu ortamlarda kullanım için popüler bir seçim haline getirir. PTFE, inert olduğu ve diğer maddelerle reaksiyona girmediği için nispeten güvenli bir malzeme olarak kabul edilir [41].

3.2. Kriterler

Termoplastik malzeme seçiminin en büyük zorluklarından biri de malzeme özelliklerinin önem derecelerinin belirlenmesidir. Son kullanıcıların, termoplastik parçanın farklı kriter özelliklerini de taşıması istemektedir. Dolayısıyla, birçok uygulamada, malzemelerin farklı özelliklerinin istenen değerlerde bir araya getirilmesi ile en iyi deney kombinasyonunun oluşturulması amaçlanmaktadır.

Bununla birlikte, malzeme seçim problemlerinin çevresel kriterler dikkate alınarak ele alınması gerekmektedir. Sürdürülebilir malzeme seçimi olarak da adlandırılan yeşil malzeme seçimi, ürün performansını garanti etmeyi ve tüm yaşam döngüsünün çevreye ve insan sağlığına olan etkisini azaltmayı amaçlamaktadır. Bu çalışmada istenilen amaç, termoplastiklerin fiziksel ve mekanik özelliklerine yeşil malzeme kriterlerini de ekleyip gerekli malzeme seçimini güçleştirmektir.

Yapılan çalışmada malzeme seçimi için incelenmesi istenen kriterler 3 ana başlık altında toplanmıştır. Bunlar; fiziksel, mekanik ve çevresel etki (yeşil) özellikleridir. Fiziksel malzeme özellikleri altında ısı iletkenliği (thermal conductivity), minimum sıcaklık (minimum temperature) ve maksimum sıcaklık (maximum temperature) seçilmiştir. Mekanik özellik olarak Young modülü (Young's modulus), uzama yüzdesi (elongation) ve eğilme modülü (flexural modulus) dikkate alınmıştır. Son olarak ise yeşil özellikler için gömülü enerji (embodied energy), karbon ayak izi (carbon footprint) ve su ayak izi (water footprint) seçilmiştir.

Termal iletkenlik, bir malzemenin ısıyı ne kadar hızlı transfer edebileceğini tanımlayan bir özelliktir. Birim sıcaklık gradyanı başına, birim zamanda bir malzemenin birim alanı boyunca aktarılabilen ısı miktarı olarak tanımlanır. Başka bir deyişle, bir malzemenin ısıyı iletme kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Metalik malzemelerle karşılaştırıldığında, termoplastikler tipik olarak daha düşük ısı iletkenliğe sahiptir [42, 43]. Mümkün olduğunca yüksek ısı iletkenliğe sahip malzemenin seçimi, bu çalışmada istenilen bir özelliktir. Bu yüzden yapılan bu araştırmada yüksek termal iletkenlik talep edilen bir özellik olarak karşımıza çıkmaktadır. Diğer önemli özellik ise minimum ve maksimum sıcaklıktır. Malzemeler günlük kullanımlarında uzun süre yüksek sıcaklıklarda kullanıldığında maksimum sıcaklık büyük önem taşırken malzemenin kırılma hale gelmemesi için minimum sıcaklık hayati önem taşımaktadır. Bu yüzden seçilecek malzemenin en yüksek ve en düşük sıcaklık aralıklarında çalışabilmesi yapılacak seçim için önemli hale gelmektedir [44, 45].

Mekanik özellik olarak seçimi yapılacak olan yeşil termoplastik malzemenin esneklik özelliği de diğer önemli bir konudur. Elastisitenin yeterli olup olmadığını belirlemek için Young modülü ve eğilme modülü incelenmektedir. Yüksek miktarda elastik bir cihaz üretimi için seçilecek olan termoplastiğin Young modülü ve eğilme modülü olabildiğince düşük olmalıdır [46]. Malzemenin kırılma özelliğini değerlendirmek için kullanılan uzama yüzdesi, çok önemli bir malzeme seçim faktörüdür. Genel olarak, küçük uzamalara sahip polimerik malzemeler kırılma kabul edilir. Bu çalışma için seçilmesi düşünülen yeşil termoplastik malzemenin uzama yüzdesinin mümkün olduğu kadar büyük olması istenilmektedir.

Son olarak çalışmanın da amacını oluşturan yeşil özelliklerinden kısaca bahsetmek gerekmektedir. Gömülü enerji, herhangi bir mal veya hizmeti üretmek için gerekli olan tüm enerjinin toplamıdır ve bu enerjinin, ürünün kendisinde birleştirilmiş veya "gömülü" olduğu düşünülmektedir. Bu konsept, enerji üreten veya enerji tasarrufu sağlayan malzemelerin etkinliğinin belirlenmesinde faydalı olabilmektedir. Bu miktarı ölçmenin temel amaçlarından biri, söz konusu ürün tarafından üretilen veya tasarruf edilen enerji miktarını, onu üretirken tüketilen enerji miktarıyla karşılaştırmaktır [47]. Bu nedenlerden ötürü seçimi yapılması istenilen termoplastik malzemenin gömülü enerjisinin mümkün olduğunca minimum olması istenilmektedir. Karbon ayak izi, üretilen sera gazı miktarı açısından malzemenin üretimi esnasında çevreye salınan birim karbondioksit cinsinden zararın ölçüsüdür [48]. Gömülü enerjide olduğu gibi seçimi yapılacak olan termoplastiğin karbon ayak izinin minimum olması istenilmektedir. Son olarak bahsedilecek olan özellik ise su ayak izidir. Su ayak izi, bir termoplastik malzemenin üretimi aşamasında su kullanım kapsamını göstermektedir [49]. Önceki yeşil malzeme özellikleri gibi seçimi yapılması istenilen termoplastik malzemenin su ayak izinin mümkün olduğu kadar düşük olması talep edilmektedir.

Üretim için kullanılması düşünülen yeşil termoplastik malzemenin istenilen özelliklerinden kısaca bahsedilmiştir. Bunlara ek olarak seçilebilecek malzemedeki beklenen en önemli özellik kolay ulaşılabilir olmasıdır. Çok kriterli

seçim yöntemlerinde kullanılacak malzemelerin fiziksel, mekanik ve çevresel etki özelliklerin ortalama değerleri Tablo 2’de, seçim kriterleri, kısaltmaları ve kriter karakterleri Tablo 3’te gösterilmiştir. Tablo 3’te belirtilen kriterler detaylı ve sistematik bir literatür araştırması ile elde edilmiş olup bu alanda çalışan uzman bir grup ile yapılan toplantılar neticesinde belirlenmiştir.

Tablo 2. Her termoplastik için fiziksel, mekanik ve çevresel etki özelliklerin ortalama değerleri [50].

	ABS	PC	PMMA	PP	PVC	PTFE
Uzama yüzdesi (%)	50,75	100	2,5	120	1,6	300
Eğilme modülü (GPa)	2,5	2,3	2,9	1,5	3	0,6
Young modülü (GPa)	2	2,2	3	1,25	3,1	0,48
Isı iletkenliği (W/m/K)	0,27	0,21	0,17	0,14	0,22	0,25
Minimum sıcaklık (°C)	-20	-30	-70	-10	-20	-250
Maksimum sıcaklık (°C)	80	120	70	130	60	260
Gömülü enerji (MJ/kg)	95	105	115	80	58	115
Karbon ayak izi (kg/kg)	3,8	6,05	6,8	3,15	2,5	6
Su ayak izi (L/kg)	180	175	76	39	210	455

Tablo 3. Kriterler ve özellikleri

Kriter Ana Grubu	Alt Kriterler	Birimler	Kısaltmalar	Kriter Karakteri
Mekanik özellikler	Uzama yüzdesi	%	UY	Maksimizasyon
	Eğilme modülü	GPa	EM	Minimizasyon
	Young modülü	GPa	YM	Minimizasyon
Fiziksel özellikler	Isı iletkenliği	W/m/K	İİ	Maksimizasyon
	Minimum sıcaklık	°C	MİNS	Minimizasyon
	Maksimum sıcaklık	°C	MAKS	Maksimizasyon
Çevresel etki (yeşil) özellikleri	Gömülü enerji	MJ/kg	GE	Minimizasyon
	Karbon ayak izi	kg/kg	KAİ	Minimizasyon
	Su ayak izi	L/kg	SAİ	Minimizasyon

4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Kriter Ağırlıkları

Bu çalışmada yeşil üretim için çevresel etki temelli termoplastik malzeme seçimine odaklanılmış ve çalışmanın hiyerarşik yapısı Şekil 1’de gösterilmiştir. Bu doğrultuda, 6 termoplastik malzeme (Akrilonitril bütadien stiren, polikarbonat, polimetametakrilit, polipropilen, polivinil klorür ve politetrafloroetilen), 3 ana ve 9 alt kriter altında değerlendirilmiştir. En uygun malzeme seçimi ise literatürde yaygın olarak kullanılan CoCoSo, COPRAS ve WASPAS yöntemlerinin uygulanması ile gerçekleştirilmiştir. İlk olarak AHP yöntemi ile kriter ağırlıkları belirlenmiştir. Bu kapsamda, ilgili alanda çalışan uzmanlarla yapılan toplantılar sonucunda kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi geliştirilmiş ve Tablo 4’te gösterilmiştir. Tablo 5’te ise normalize edilmiş karar matrisi ve kriter ağırlık değerleri verilmiştir. Ağırlık değerleri dikkate alındığında en önemli kriter karbon ayak izi olarak seçilmiştir. Daha sonra ise su ayak izi ve sonrasında gömülü enerji en önemli kriterler olarak belirlenmiştir.

Karbon ayak izi, yeşil üretim için seçilecek termoplastikler için en önemli kriter olarak kabul edilir, çünkü hammadde çıkarma, üretim, nakliye, kullanım ve bertaraf dahil olmak üzere ürünün tüm yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan sera gazı emisyonlarının miktarını ölçer. Termoplastikler ambalaj, otomotiv, inşaat ve elektronik gibi çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır ve karbon ayak izleri nedeniyle çevre üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, düşük karbon ayak izine sahip termoplastiklerin seçilmesi, bu endüstrilerin çevresel etkilerinin azaltılmasına yardımcı olabilmektedir. Daha düşük karbon ayak izine sahip malzemeler seçilerek iklim değişikliğine katkıda bulunan sera gazı emisyonları ciddi bir biçimde azaltılabilir. Ayrıca, karbon ayak izinin azaltılması bu alanda çalışan şirketlerin enerji tüketimlerini ve işletme maliyetlerini azaltmalarına yardımcı olarak üretim süreçlerini daha verimli ve sürdürülebilir hale getirecektir. Özetle, karbon ayak izi, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olduğu ve sürdürülebilir üretim uygulamalarını teşvik ettiği için yeşil üretim için termoplastik seçimindeki en önemli kriter olarak belirlenmiştir [51].

Su ayak izi, yeşil üretim için seçilecek termoplastikler için karbon ayak izinden sonraki en önemli kriterdir. Bunun en önemli nedeni ise suyun yaşam için gerekli olan değerli bir kaynak olmasından ileri gelmektedir. İklim değişikliği, nüfus artışı ve diğer faktörler nedeniyle birçok bölgede giderek daha az bulunur hale gelmiştir. Termoplastiklerin üretimi hem üretim sürecinin kendisi hem de üretimde kullanılan hammaddelerin çıkarılması için önemli miktarda su tüketimi gerektirmektedir. Buna ek olarak, plastik atıkların bertarafı, su kaynaklarının kirlenmesi ve de yeraltı su kaynaklarının tükenmesi gibi su kaynakları üzerinde de önemli etkilere neden olabilir. Bu nedenle, düşük su ayak izine sahip termoplastiklerin seçilmesi, su kaynakları üzerindeki baskının azaltılmasına

ve sürdürülebilir üretim uygulamalarının teşvik edilmesine çok büyük faydalar sağlayabilmektedir. Daha düşük su ayak izine sahip malzemeler seçilerek su kullanımı azaltılabilir ve bu değerli kaynağın verimli kullanımını teşvik edilebilir. Ayrıca, su ayak izinin azaltılması, daha az su tüketimi ve su arıtma ve bertarafıyla ilgili daha düşük maliyetler gibi kullanıcılar için ek ekonomik faydalar da sağlayabilmektedir. Özetlersek, su ayak izi, yeşil üretim için termoplastik seçiminde karbon ayak izinden sonraki en önemli kriterdir. Bunun en büyük nedeni su kullanımını azaltmaya yardımcı olmasıdır. Buna ek olarak sürdürülebilir üretim uygulamalarını teşvik eder ve kullanıcıları için ekonomik faydalar sağlar [52].

Karbon ve su ayak izinden sonraki en önemli seçim kriterimiz ise gömülü enerjidir. Gömülü enerji, yeşil üretim için termoplastik seçiminde dikkate alınması gereken diğer önemli bir faktördür. Çünkü malzemenin üretilmesi, taşınması, kullanılması ve bertaraf edilmesi için gereken enerji miktarını yansıtır. Termoplastiklerin üretimi, sera gazı emisyonlarına ve iklim değişikliğine katkıda bulunan önemli miktarda enerji içerir. Farklı termoplastiklerin gömülü enerjileri göz önünde bulundurularak, üreticiler üretmek için daha az enerji gerektiren malzemeleri seçebilir, bu da sera gazı emisyonlarını ve enerji tüketimini azaltabilmektedir. Bu, daha sürdürülebilir üretim uygulamalarına ve üretim sürecinin genel çevresel etkisinin azaltılmasına yönelik önemli bir adımdır. Enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını azaltmanın yanı sıra, daha düşük gömülü enerjiye sahip termoplastiklerin seçilmesi de üreticiler için maliyet tasarrufu sağlayabilir. Üreticiler, malzemeyi üretmek için gereken enerji miktarını azaltarak enerji faturalarını düşürebilir ve potansiyel olarak nihai ürünün maliyetini azaltabilirler [53]. Genel olarak, gömülü enerjinin dikkate alınması, üreticilerin enerji tüketimini, sera gazı emisyonlarını ve maliyetleri azaltmasına yardımcı olurken aynı zamanda daha sürdürülebilir üretim uygulamalarına katkıda bulunabileceğinden, yeşil üretim için termoplastik malzeme seçiminin önemli bir yönüdür. Kriterlerin belirlenmesinde görüşlerine başvuru uzman grup ile yapılan beyin fırtınası neticesinde Tablo 4'te verilen ikili karşılaştırma matrisi geliştirilmiştir. Bu matriste her bir kriter diğer kriterler ile Tablo 1'de verilen ve AHP yönteminde kullanılan 1-9 skalası dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Örneğin, karbon ayak izi (KAİ) kriterinin su ayak izi (SAİ) kriterinden bir derece daha önemli olmasından dolayı KAİ'nin SAİ'ye olan üstünlüğü 2 puan ile değerlendirilmiştir. Aynı şekilde, önceki paragraflardaki açıklamalar dikkate alındığında KAİ'nin gömülü enerji (GE) kriterinden orta derecede önemli olduğu kararına varıldığından dolayı 3 puan ile puanlanmıştır.

Tablo 4. Kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi.

	UY	EM	YM	İİ	MİNS	MAKS	GE	KAİ	SAİ
UY	1	2	1/5	1/2	1/3	1/4	1/6	1/8	1/7
EM	1/2	1	1/6	1/4	1/4	1/5	1/7	1/9	1/8
YM	5	6	1	3	4	2	1/2	1/4	1/3
İİ	2	4	1/3	1	2	1/2	1/4	1/6	1/5
MİNS	3	4	1/4	1/2	1	1/3	1/5	1/7	1/6
MAKS	4	5	1/2	2	3	1	1/3	1/5	1/4
GE	6	7	2	4	5	3	1	1/3	1/2
KAİ	8	9	4	6	7	5	3	1	2
SAİ	7	8	3	5	6	4	2	1/2	1

Çevresel etki özellikleri olan karbon ayak izi, su ayak izi ve de gömülü enerji kriterlerinden sonraki en önemli seçim kriteri Young modülü olmuştur. Düşük Young modülüne sahip termoplastikler daha esnektir ve ambalaj veya otomotiv endüstrileri gibi elastikiyet ve tekrarlanan bükülme veya deformasyona dayanma yeteneği gerektiren uygulamalar için çok daha uygundur. Bu çalışmada da seçilecek termoplastikten daha çevreci olmasının yanı sıra elastik cihaz üretimlerine de uygun olması beklendiğinden Young modülü çevresel etki kriterlerinden sonraki en önemli kriter haline gelmiştir.

Young modülünü takip eden kriter maksimum sıcaklıktır. Seçimi yapılacak olan termoplastik malzemenin mümkün olduğunca yüksek sıcaklıklara dayanımı istendiğinden maksimum sıcaklık kriterinin ağırlığı diğer kriterlerin ağırlıklarından fazla olmuştur. Bu iki kriteri takip eden kriter ısı iletkenliğidir. Yüksek ısı iletkenliğine sahip malzemeler, ısıyı düşük ısı iletkenliğine sahip malzemelere göre daha hızlı aktarabilir. Bu özellik, elektronik cihazlar veya ısının dağıtılması gereken üretim süreçleri gibi sıcaklık kontrolünün kritik olduğu uygulamalarda özellikle önemlidir. Bu çalışmada da seçimi yapılacak olan termoplastığın ısı iletkenliği mümkün olduğu kadar yüksek olması istendiğinden ısı iletkenliğinin kriter ağırlığı yüksek bir değer alınmıştır. Bu değerleri de sırayla; minimum sıcaklık, uzama yüzdesi ve de eğilme modülü takip etmektedir.

Tablo 5. Normalize karar matrisi ve kriter ağırlıkları (%).

	UY	EM	YM	İİ	MİNS	MAKS	GE	KAİ	SAİ	Ağırlıklar
UY	0,03	0,04	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,04	0,03	2,60
EM	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,03	1,85
YM	0,14	0,13	0,09	0,13	0,14	0,12	0,07	0,09	0,07	10,86
İİ	0,05	0,09	0,03	0,04	0,07	0,03	0,03	0,06	0,04	5,01
MİNS	0,08	0,09	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,05	0,04	4,23
MAKS	0,11	0,11	0,04	0,09	0,10	0,06	0,04	0,07	0,05	7,62
GE	0,16	0,15	0,17	0,18	0,17	0,18	0,13	0,12	0,11	15,40
KAİ	0,22	0,20	0,35	0,27	0,24	0,31	0,40	0,35	0,42	30,65
SAİ	0,19	0,17	0,26	0,22	0,21	0,25	0,26	0,18	0,21	21,78

Tablo 4'te gösterilen kriterlerin ikili karşılaştırma matrisinin tutarlık analizi yapılmış olup Tablo 6'da parametreler ve bunların değerleri gösterilmektedir. Sonuçlara göre tutarlık indeksi 0,0599 olarak hesaplanmıştır. Matrisin tutarlık oranı ise 0,04 olarak bulunmuş olup eşik değer olan 0,10'dan küçük olduğu tespit edilmiştir. Böylelikle AHP yönteminden elde edilen kriter ağırlık değerleri alternatif malzemelerinin sıralanmasında kullanılan ÇKKV yaklaşımlarında kullanılabilir.

Tablo 6. Tutarlılık oranı

Parametreler	Değerleri
Karşılaştırma sayısı	9
Ortalama tutarlılık (λ_{max})	9,48
Tutarlılık indeksi (CI)	0,0599
Rassal tutarlılık indeksi (RI)	1,45
Tutarlılık oranı (CR)	0,04

4.2. Alternatiflerin Sıralanması

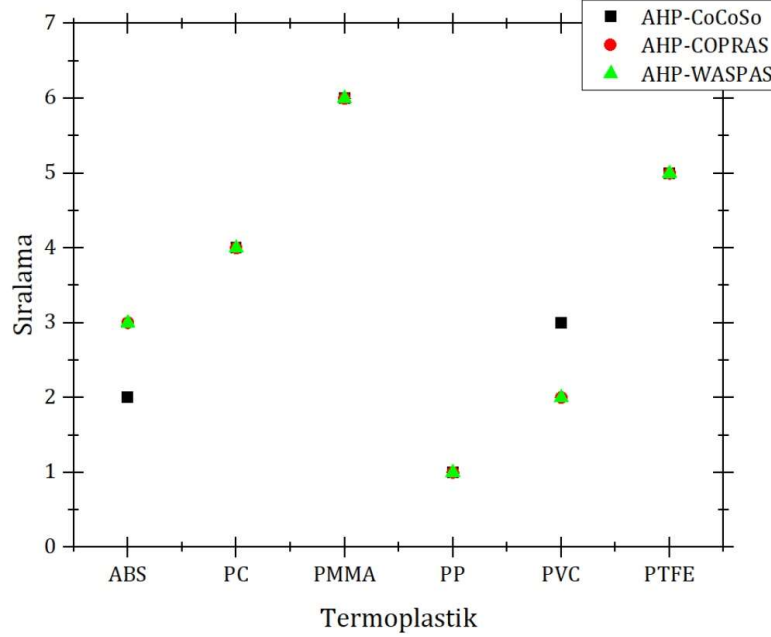
AHP-CoCoSo, AHP-COPRAS ve AHP-WASPAS dahil olmak üzere üç farklı hibrid ÇKKV yaklaşımı, alternatifleri önceliklendirmek için mevcut çalışmada başarı ile kullanılmıştır. AHP-CoCoSo, AHP-COPRAS ve AHP-WASPAS aracılığıyla elde edilen alternatiflerin sıralaması Tablo 7'de özetlenmiş ve sonuçlarda Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2 ve Tablo 7'den de görülebileceği gibi, malzeme alternatiflerinin sıralamasının temelinde tutarlı olduğu üç yöntem aracılığıyla özetlenebilmektedir. Sonuç olarak, önerilen yöntem alternatif malzeme seçeneklerinin performansını değerlendirmek ve yeşil üretim için en uygun termoplastik malzemeyi seçmek için makul ve etkili bir yoldur. Bu üç yöntemin sonuçlarına göre PP, yeşil üretim için seçilmesi planlanan en uygun termoplastik malzeme olmuştur. Üç yöntemde de (AHP-CoCoSo, AHP-COPRAS ve AHP-WASPAS), PP ilk sırayı almıştır. Bunun arkasındaki en önemli neden ise çevresel etki özelliklerinde diğer termoplastikler ile kıyaslandığında daha uygun sonuçlar vermesidir. Örneğin, su ayak izi kriterindeki en düşük değere sahip olması buna ek olarak gömülü enerji ile karbon ayak izinde ise en düşük değerlere sahip ikinci termoplastik olması en önemli nedenlerdir. Bunlara ek olarak; Young modülü, maksimum sıcaklık ve uzama yüzdesinde PTFE'den sonraki en başarılı ikinci termoplastik malzeme olması onu 3 farklı ÇKKV yaklaşımında neden birinci malzeme olduğunun en büyük ispatıdır.

Young modülü, maksimum sıcaklık ve de uzama yüzdesinde PP'den daha iyi değerler vermesine rağmen PTFE 3 farklı ÇKKV yaklaşımında da kendisine 5. Sırada yer bulmuştur. Bunun arkasındaki en önemli etken ise çevresel etki özelliklerinde göstermiş olduğu kötü performansdır. Su ayak izinde en yüksek değeri (455 L/kg) göstermekle birlikte, gömülü enerji (115 MJ/kg) ve de karbon ayak izinde (6 kg/kg) de çok yüksek değerler gösterdiği için 5. sırada yer almıştır.

Diğer bir dikkat çeken termoplastik ise PVC'dir. PVC, AHP-COPRAS ve de AHP-WASPAS yöntemlerinde 2. sırada yer alırken, AHP-CoCoSo yönteminde ise 3. sırada yer almıştır. Üst sıralarda yer almasındaki en önemli neden ise gömülü enerji (58 MJ/kg) ve de karbon ayak izindeki (2,5 kg/kg) en düşük değere sahip olmasıdır. Genel sıralamada PP'nin arkasında kalmasının nedeni ise mekanik ve fiziksel özelliklerde istenilenin uzağında olmasıdır. Örneğin, en yüksek Young modülüne sahip termoplastik PVC'dir. Buna ek olarak en düşük uzama yüzdesine ve en düşük maksimum sıcaklığa sahip malzeme olması da PP'nin gerisinde kalmasındaki en önemli nedenler arasında gösterilebilir. Son olarak diğer dikkat çeken bir özellik ise; PC'nin bütün yöntemlerde 4. sırada, PMMA'nın ise bütün yöntemlerde 6. sırada yer almasıdır.

Tablo 7. Hibrit ÇKKV yaklaşımlarıyla alternatif termoplastik malzemelerin sıralaması ve parametre değerleri.

Termoplastik	AHP-CoCoSo					AHP-COPRAS				AHP-WASPAS			
	k_a	k_b	k_c	k	Sıralama	S_{+i}	S_{-i}	Q_i	Sıralama	Q_i^1	Q_i^2	Q_i	Sıralama
ABS	0,203	4,021	0,981	2,663	2	0,022	0,125	0,645	3	0,981	0,473	0,727	3
PC	0,191	3,110	1,040	2,299	4	0,026	0,154	0,556	4	0,724	0,411	0,568	4
PMMA	0,148	2,298	1,028	1,863	6	0,014	0,158	0,500	6	0,527	0,376	0,451	6
PP	0,172	4,462	1,085	2,848	1	0,025	0,078	1,000	1	1,755	0,807	1,281	1
PVC	0,125	3,709	1,076	2,428	3	0,015	0,118	0,657	2	1,109	0,472	0,791	2
PTFE	0,162	3,008	1,045	2,203	5	0,051	0,215	0,525	5	0,542	0,402	0,472	5

**Şekil 2.** AHP-CoCoSo, AHP-COPRAS ve AHP-WASPAS yaklaşımlarından elde edilen sıralamaların karşılaştırması

Literatürde [54, 55], Spearman'ın sıralama korelasyon analizi ÇKKV yöntemlerinin birbiriyle ne kadar yakın sonuçlar ürettiğini tespit etmek için yapılmaktadır. Bu çalışmadaki AHP temelli üç farklı ÇKKV yaklaşımlarının ürettikleri sıralamaların yakınlıklarını analiz etmek için Spearman'ın sıralama korelasyon katsayıları hesaplanmış ve Tablo 8'de verilmiştir. Tüm yaklaşımların birbirleriyle olan korelasyon katsayıları 0,90 değerinden daha yüksek olarak bulunmuştur. Hatta, AHP temelli COPRAS ve WASPAS yöntemleri birbirlerinin benzeri sonuçlar üretmiştir.

Tablo 8. Spearman'ın sıralama korelasyon katsayı değerleri.

	AHP-CoCoSo	AHP-COPRAS	AHP-WASPAS
AHP-CoCoSo	1,0000	0,9430	0,9430
AHP-COPRAS		1,0000	1,0000
AHP-WASPAS			1,0000

5. Sonuç

Yeşil ya da bir diğer adı ile sürdürülebilir malzeme seçimi kavramı, çevre koruma bilincinin topluma entegre edilmesine bir yanıt olarak geliştirilmiştir. Bu nedenle, endüstri ve akademik dünya, çevre dostu yeşil termoplastik malzemelerin rekabetçi pazarını sürdürmek için elinden geleni yapmak zorundadır. Yeşil termoplastik malzeme seçimi kavramı birçok nedenden dolayı önemlidir. Bunların başında; çevresel etki, enerji tüketimi, sağlık, güvenlik ve kurumsal sosyal sorumluluk alanları başta gelmektedir.

Çok kriterli karar verme teknikleri kullanılarak, uygun yeşil termoplastik malzemelerin seçilmesi sorunu, mekanik, fiziksel ve de çevresel etki özelliklerine göre çözülmüştür. Bu amaç doğrultusunda altı termoplastik malzemeyi güvenilir bir şekilde seçmek için üç çok kriterli karar verme (ÇKKV) metodolojisi kullanılmıştır. Bunlar sırası ile AHP-CoCoSo, AHP-COPRAS ve AHP-WASPAS'dır. Elde edilen sonuçlar neticesinde, hibrit ÇKKV teknikleri ile sıralamalarda çok büyük benzerlikler olduğunu ortaya konmuştur. En ideal termoplastik 3 farklı yöntemde de PP olarak belirlenmiştir. Onu PVC ve de ABS takip etmektedir. Çalışmadaki en dikkat çeken sonuç AHP-CoCoSo, AHP-

COPRAS ve AHP-WASPAS yöntemlerinin neredeyse aynı sonucu vermeleridir. Sadece, ABS ve PVC için çok küçük bir farklılık söz konusu olmuştur. ABS, AHP-COPRAS ve AHP-WASPAS yöntemlerinde 3. sıradayken AHP-CoCoSo'da 2. olmuştur. PVC ise AHP-COPRAS ve AHP-WASPAS yöntemlerinde 2. Sıradayken AHP-CoCoSo'da 3. olmuştur.

Mevcut çalışmanın en bariz sınırı, belirli sayıda termoplastik malzemenin dikkate alınmış olmasıdır. Sadece piyasada en çok kullanılan 6 termoplastik malzeme seçilmiştir. Bu çalışmada kullanılan termoplastiklerin sayısının gelecek çalışmalar açısından artırılması düşünülebilir. Buna ek olarak, değerlendirme kriterleri ise 9 alt kriter ile sınırlandırılmıştır. Çalışmanın kapsamı, mevcut mekanik, fiziksel ve çevresel etki özellikleri gibi seçim parametrelerine ilave özellikler eklenerek daha da genişletilebilir. Ayrıca, mevcut çalışmada, ileride yapılacak araştırmaların kapsamı olarak düşünülebilecek olan malzeme seçimine karar vermede var olan belirsizlik hariç tutulmuştur.

Bu araştırma, yeşil üretim için uygun termoplastik malzeme seçimi probleminin üstesinden gelmek için entegre bir hibrit çok kriterli karar verme yaklaşımını tanıtmıştır. Malzeme seçim sırasını desteklemek için başvuru literatüre dayalı çalışmalar, bunların gerçek yeşil üretim süreçlerinde kullanılmasının pratik olacağını gösterebilmiştir. Önerilen stratejinin mantığı ve güvenilirliği mevcut yaklaşımla karşılaştırılarak gösterilmiştir. Yaklaşımın verimliliği ve basitliği, onu daha geniş bir malzeme seçimi yelpazesine uygulanabilir kılmaktadır. Yeşil imalat için malzeme ve de özellikle termoplastik malzeme seçmek isteyen yeni araştırmacılara fayda sağlayacaktır. Çalışma, yeşil üretim için malzeme seçim sürecinde yaşanan zaman ve iş gücü kayıplarını azaltarak imalat ve akademik sektörlerdeki temsilcilere çok önemli yararlar sağlayacaktır.

Kaynakça

- [1] Dornfeld, D. A. (Ed.). 2012. Green manufacturing: fundamentals and applications. Springer Science & Business Media.
- [2] Sezen, B., Cankaya, S. Y. 2013. Effects of green manufacturing and eco-innovation on sustainability performance. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 99, 154-163.
- [3] Rusinko, C. 2007. Green manufacturing: an evaluation of environmentally sustainable manufacturing practices and their impact on competitive outcomes. *IEEE transactions on engineering management*, 54(3), 445-454.
- [4] Emovon, I., Oghenyerovwho, O. S. 2020. Application of MCDM Method in Material Selection for Optimal Design: A Review. *Results in Materials*, 7, 100115.
- [5] Biron, M. 2018. Thermoplastics and Thermoplastic Composites. 3rd edition. William Andrew, 1143s.
- [6] Larson, E. R. 2015. Introduction. ss 1-18. *Thermoplastic Material Selection*, Elsevier Science & Technology Books, USA, 364s.
- [7] Grigore, M. E. . 2017. Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers. *Recycling*, 2(4), 24.
- [8] Larson, E. R. 2015. Why Use Plastic?. ss 19-56. *Thermoplastic Material Selection*, Elsevier Science & Technology Books, USA, 364s.
- [9] Zhang, H., Peng, Y., Tian, G., Wang, D., Xie, P. 2017. Green Material Selection for Sustainability: A Hybrid MCDM Approach. *PLoS One*, 12(5), e0177578.
- [10] Remadi, F. D., Frikha, H. M. 2020. The Triangular Intuitionistic Fuzzy Extension of the CODAS Method for Solving Multi-Criteria Group Decision Making. 2020 International Multi-Conference on: Organization of Knowledge and Advanced Technologies, 6-8 February, Tunisia.
- [11] Akadiri, P. O., Olomolaiye, P. O., Chinyio, E. A. 2013. Multi-Criteria Evaluation Model for the Selection of Sustainable Materials for Building Projects. *Automation in Construction*, 30, 113-125.
- [12] Govindan, K., Madan Shankar, K., Kannan, D. 2016. Sustainable Material Selection for Construction Industry - A Hybrid Multi Criteria Decision Making Approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 1274-1288.
- [13] Khoshnava, S. M., Rostami, R., Valipour, A., Ismail, M., Rahmat, A. R. 2018. Rank of Green Building Material Criteria Based on the Three Pillars of Sustainability Using the Hybrid Multi Criteria Decision Making Method. *Journal of Cleaner Production*, 173, 82-99.

- [14] Ghorabae, M. K., Amiri, M., Zavadskas, E. K., Hooshmand, R., Antuchevičienė, J. 2017. Fuzzy Extension of the CODAS Method for Multi-Criteria Market Segment Evaluation. *Journal of Business Economics and Management*, 18(1), 1-19.
- [15] Mon, D. L., Cheng, C. H., Lin, J. C. 1994. Evaluating Weapon System Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process Based on Entropy Weight. *Fuzzy Sets and Systems*, 62(2), 127-134.
- [16] Höfer, T., Sunak, Y., Siddique, H., Madlener, R. 2016. Wind Farm Siting Using a Spatial Analytic Hierarchy Process Approach: A Case Study of the Städteregion Aachen. *Applied Energy*, 163, 222-243.
- [17] Yang, K., Zhu, N., Chang, C., Wang, D., Yang, S., Ma, S. 2018. A Methodological Concept for Phase Change Material Selection Based on Multi-Criteria Decision Making (MCDM): A Case Study. *Energy*, 165, 1085-1096.
- [18] Thokala, P., Devlin, N., Marsh, K., Baltussen, R., Boysen, M., Kalo, Z., Longrenn, T., Mussen, F. Peacock, S., PharmD, J. W., Ijzerman, M. 2016. Multiple Criteria Decision Analysis for Health Care Decision Making - An Introduction: Report 1 of the ISPOR MCDA Emerging Good Practices Task Force. *Value in Health*, 19(1), 1-13.
- [19] Xu, H., Romagnoli, A., Sze, J. Y., Py, X. 2017. Application of Material Assessment Methodology in Latent Heat Thermal Energy Storage for Waste Heat Recovery. *Applied Energy*, 187, 281-290.
- [20] Saaty, T. L. 2008. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*, 1, 83-98.
- [21] Sánchez-Lozano, J. M., García-Cascales, M. S., Lamata, M. T. 2016. GIS-Based Onshore Wind Farm Site Selection Using Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Methods. Evaluating the Case of Southeastern Spain. *Applied Energy*, 171, 86-102.
- [22] Riabacke, M., Danielson, M., Ekenberg, L. 2012. State-of-the-Art Prescriptive Criteria Weight Elicitation. *Advances in Decision Sciences*, 2012, 276584.
- [23] Ecer, F., Pamucar, D. 2020. Sustainable Supplier Selection: A Novel Integrated Fuzzy Best Worst Method (FBWM) and Fuzzy CoCoSo with Bonferroni (CoCoSo'B) Multi-Criteria Model. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121981.
- [24] Yazdani, M., Wen, Z., Liao, H., Banaitis, A., Turskis, Z. 2019. A Grey Combined Compromise Solution (CoCoSo-G) Method for Supplier Selection in Construction Management. *Journal of Civil Engineering and Management*, 25(8), 858-874.
- [25] Yazdani, M., Zarate, P., Kazimieras Zavadskas, E., Turskis, Z. 2019. A Combined Compromise Solution (CoCoSo) Method for Multi-Criteria Decision-Making Problems. *Management Decision*, 57(9), 2501-2519.
- [26] Zelany, M. 1974. A Concept of Compromise Solutions and the Method of the Displaced Ideal. *Computers & Operations Research*, 1(3-4), 479-496.
- [27] Xu, Z. 2012. Intuitionistic Fuzzy Multiattribute Decision Making: An Interactive Method. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 20(3), 514-525.
- [28] Asgharnia, A., Schwartz, H., Atia, M. 2023. Multi-Objective Fuzzy Q-Learning to Solve Continuous State-Action Problems. *Neurocomputing*, 516, 115-132.
- [29] Alinezhad, A., Khalili, J. 2019. New methods and applications in multiple attribute decision making (MADM). ss 87-98. Springer Nature, Switzerland, 233s.
- [30] Keshavarz Ghorabae, M., Amiri, M., Salehi Sadaghiani, J., Hassani Goodarzi, G. 2014. Multiple Criteria Group Decision-Making for Supplier Selection Based on COPRAS Method with Interval Type-2 Fuzzy Sets. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(5-8), 1115-1130.
- [31] Kazimieras Zavadskas, E., Kaklauskas, A., Peldschus, F., Turskis, Z. 2007. Multi-Attribute Assessment of Road Design Solutions by Using the Copras Method. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2(4), 195-203.
- [32] Chauvy, R., Lepore, R., Fortemps, P., De Weireld, G. 2020. Comparison of Multi-Criteria Decision-Analysis Methods for Selecting Carbon Dioxide Utilization Products. *Sustainable Production and Consumption*, 24, 194-210.
- [33] Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., Amiri, M., Esmaeili, A. 2016. Multi-Criteria Evaluation of Green Suppliers Using an Extended WASPAS Method with Interval Type-2 Fuzzy Sets. *Journal of Cleaner Production*, 137, 213-229.
- [34] Chakraborty, S., Zavadskas, E. K. 2014. Applications of WASPAS Method in Manufacturing Decision Making. *Informatica*, 25(1), 1-20.

- [35] Peterson, A. M. 2019. Review of Acrylonitrile Butadiene Styrene in Fused Filament Fabrication: A Plastics Engineering-Focused Perspective. *Additive Manufacturing*, 27, 363-371.
- [36] Larson, E. R. 2015. An Overview of Thermoplastic Materials. ss 97-143. *Thermoplastic Material Selection*. Elsevier Science & Technology Books, USA, 364s.
- [37] Ogończyk, D., Wgrzyn, J., Jankowski, P., Dąbrowski, B., Garstecki, P. 2010. Bonding of Microfluidic Devices Fabricated in Polycarbonate. *Lab on a Chip*, 10, 1324-1327.
- [38] Liga, A., Morton, J. A. S., Kersaudy-Kerhoas, M. 2016. Safe and Cost-Effective Rapid-Prototyping of Multilayer PMMA Microfluidic Devices. *Microfluidics and Nanofluidics*, 20(12), 164.
- [39] Der, O., Marengo, M., Bertola, V. 2019. Thermal Performance of Pulsating Heat Stripes Built with Plastic Materials. *Journal of Heat Transfer*, 141(9), 091808.
- [40] Hamed, M. M., Ünal, B., Kerr, E., Glavan, A. C., Fernandez-Abedul, M. T., Whitesides, G. M. 2016. Coated and Uncoated Cellophane as Materials for Microplates and Open-Channel Microfluidics Devices. *Lab on a Chip*, 16, 3885-3897.
- [41] Rowe, D. J., Porch, A., Barrow, D. A., Allender, C. J. 2012. Microfluidic Device for Compositional Analysis of Solvent Systems at Microwave Frequencies. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 169, 213-221.
- [42] Tarannum F., Muthaiah, R., Annam, R. S., Gu, T., Garg, J. 2020. Effect of Alignment on Enhancement of Thermal Conductivity of Polyethylene-Graphene Nanocomposites and Comparison with Effective Medium Theory. *Nanomaterials*, 10(7), 1291.
- [43] Chae, H. G., Kumar, S. 2008. Making Strong Fibers. *Science*, 319(5865), 908-909.
- [44] Kalpakjian, S. 2001. Manufacturing Engineering and Technology. *Journal of Emerging Technologies in Engineering Research*, 3(2).
- [45] Rodrigues, R. O., Lima, R., Gomes, H. T., Silva, A. M. T. 2015. Polymer Microfluidic Devices: An Overview of Fabrication Methods. *U.Porto Journal of Engineering*, 1(1), 67-79.
- [46] Callister, W. D. 1991. *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York, 871s.
- [47] Gupta, D., Gaur, S. K. 2019. Carbon and Biofuel Footprinting of Global Production of Biofuels. Verma, D., Fortunati, E., Jain, S., Zhang, X, ed. 2019. *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy: Construction, Biomedical, and Other Industrial Applications*, Woodhead Publishing, UK, 558s.
- [48] Plassmann, K., Edwards-Jones, G. 2010. Carbon Footprinting and Carbon Labelling of Food Products. ss 272-296. Sonesson, U., Berlin, J., Ziegler, F., ed. 2010. *Environmental Assessment and Management in the Food Industry*, Woodhead Publishing, UK, 432s.
- [49] Buonomano, A., Barone, G., Forzano, C. 2022. Advanced Energy Technologies, Methods, and Policies to Support the Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. *Energy Reports*, 8, 4844-4853.
- [50] Maine, E., Ashby, M. F. 1994. *Materials Selection in Mechanical Design*. ss 5230-5236. Jürgen Buschow, K. H., Flemings, M. C., Kramer, E. J., Veysi ere, P., Cahn, R. W., Ilschner, B., Mahajan, S., ed. 1994. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Pergamon.
- [51] Arora, N. K., Mishra, I. 2022. Progress of Sustainable Development Goal 7: Clean and Green Energy for All as the Biggest Challenge to Combat Climate Crisis. *Environmental Sustainability*, 5(4), 395-399.
- [52] Desole, M. P., Aversa, C., Barletta, M., Gisario, A., Vosooghnia, A. 2022. Life Cycle Assessment (LCA) of PET and PLA Bottles for the Packaging of Fresh Pasteurised Milk: The Role of the Manufacturing Process and the Disposal Scenario. *Packaging Technology and Science*, 35(2), 135-152.
- [53] Bontempi, E. 2017. A New Approach for Evaluating the Sustainability of Raw Materials Substitution Based on Embodied Energy and the CO₂ Footprint. *Journal of Cleaner Production*, 162, 162-169.
- [54] Grgen, S.,  akır, F. H., Sofuođlu, M. A., Orak, S., Kuşhan, M. C., Li, H. 2019. Multi-Criteria Decision-Making Analysis of Different Non-Traditional Machining Operations of Ti6Al4V. *Soft Computing*, 23, 5259-5272.
- [55] Kalita, K., Madhu, S., Ramachandran, M., Chakraborty, S., Ghadai, R. K. 2023. Experimental Investigation and Parametric Optimization of a Milling Process Using Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Analysis. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 17(1), 453-467.